

Dual-Bell ノズル内の流れ構造に関する数値解析

Numerical Investigation of Flow Characteristics in a Dual-Bell Nozzle

- 大津広敬, 静岡大学工学部機械工学科, 静岡県浜松市城北 3-5-1, E-mail : thooutu@ipc.shizuoka.ac.jp
宮澤政文, 静岡大学工学部機械工学科, 静岡県浜松市城北 3-5-1, E-mail : tmmmiya@ipc.shizuoka.ac.jp
竹内奨, 静岡大学大学院理工学研究科, 静岡県浜松市城北 3-5-1, E-mail : f0030040@ipc.shizuoka.ac.jp
Hirotaka OTSU, Shizuoka University, Johoku 3-5-1, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561
Masafumi MIYAZAWA, Shizuoka University, Johoku 3-5-1, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561
Susumu TAKEUCHI, Graduate School of Shizuoka University, Johoku 3-5-1, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561

We performed a numerical simulation to investigate the flow structure in a dual-bell nozzle. A dual-bell nozzle concept offers an altitude adaptation by adding the inflection point inside the nozzle. In low altitudes, controlled and symmetrical flow separation occurs at this inflection point, which results in a smaller effective area ratio. In higher altitudes, the nozzle flow attached to the wall until the exit plane and the full area ratio is used. From the numerical results, we could confirm that the change of the flow structure from low altitude mode to high altitude mode occurred instantly according to the atmospheric pressure.

1. はじめに

再使用型宇宙輸送機の実現には、高性能なロケットエンジンが求められているが、ロケットエンジンのノズル部分の性能向上の有望な手法の 1 つに Dual-Bell ノズル⁽¹⁾が挙げられる。Dual-Bell ノズルの概略図を Fig. 1 に示す。このノズルは、ベル型ノズル内に変曲部を用意することにより、低高度、即ち、大気圧が高いところでは、変曲部で衝撃波を発生させることにより流れを安定に剥離させ、小さい膨張比で運用し、高々度ではノズル出口まで流れを膨張させ、出口での大きな膨張比を利用することが可能である。そのため、1 つのノズルで有効ノズル膨張比を 2 つ取ることができるため、飛行経路上の 2 点で高度適応が可能となり、特に、高々度での性能向上が期待されている。しかしながら、実験データがほとんどないため、その実際の流れ場の様子は、まだよくわかっていないのが現状である。特に、どのような条件で流れ構造の遷移が起きるか、また、その剥離位置の遷移は瞬間的で、かつ、安定しているかどうかは実際の運用上重要である。

本研究では、Dual-Bell ノズル内の流れ構造を調べるために数値解析を行い、特に大気圧の変化によるノズル内の流れの剥離への影響を調べた。

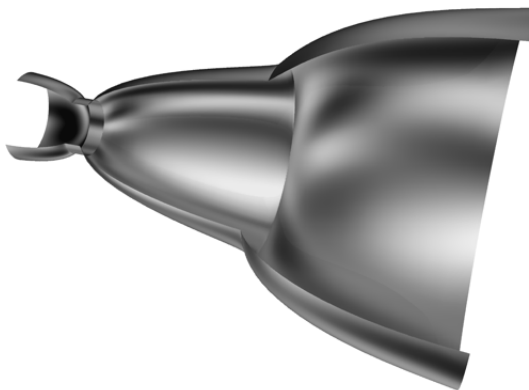


Fig. 1 Sketch of a dual-bell nozzle

2. 解析手法

支配方程式

流れ場は軸対称を仮定し、支配方程式には、ナビエ・ストークス方程式を用いた。粘性係数にはサザーランドの式を用い、乱流モデルは使用していない。これは、Dual-Bell ノズル内流れの剥離が、変曲部における衝撃波の発生に伴う現象であると考えているためである。粘性モデルの影響が小さいことを確認するために、粘性係数を 10 倍にして計算を行ったところ、剥離位置に影響は見られなかった。

計算手法

計算スキームには、AUSM-DV スキーム⁽²⁾を利用した。時間積分には、オイラー陽解法を用い、局所時間刻みを利用し計算時間の効率化を図っている。

計算格子は、ノズル部分と外部領域に分割されている。格子点数は、ノズル部分で表面に沿って 200 点、対称軸に垂直な方向に 50 点、合計 10000 点である。また、外部領域はノズル全長の約 6 倍となっており、対称軸に平行な方向に 70 点、対称軸に垂直な方向に 120 点、合計 8400 点である。計算格子を Fig. 2 に示す。横軸、縦軸はそれぞれノズルスロート部の半径で無次元化されている。

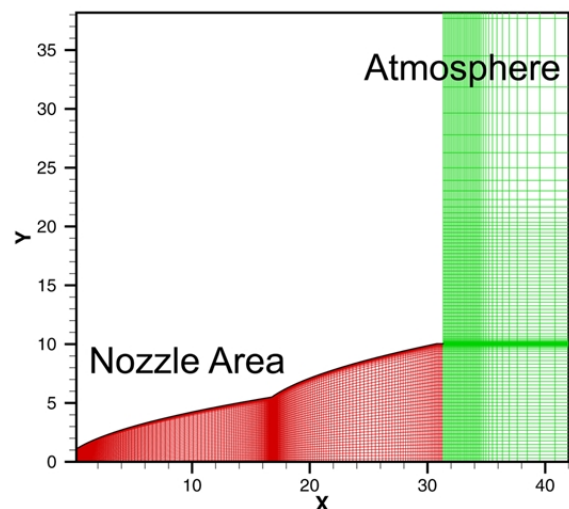


Fig. 2 Computational grid for a dual-bell nozzle

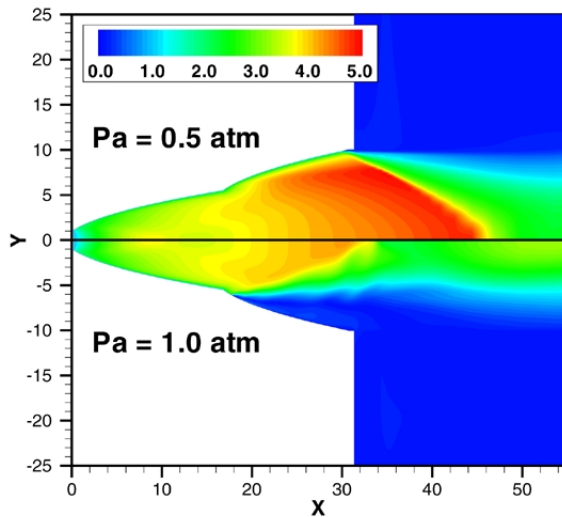


Fig. 3 Mach number distribution inside a dual-bell nozzle

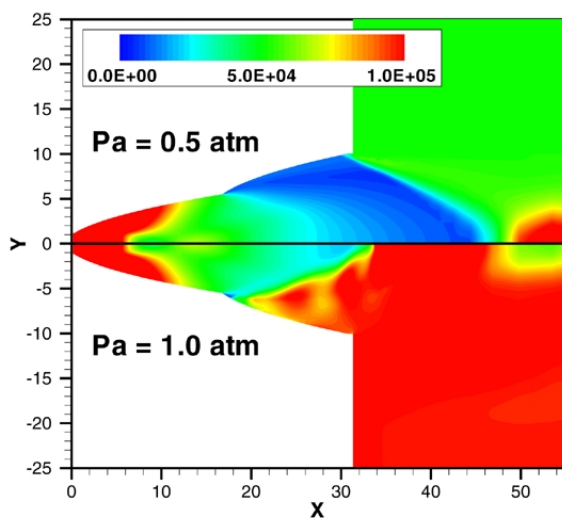


Fig. 4 Pressure distribution inside a dual-bell nozzle

3. 解析条件

計算に用いたノズルの形状は、変曲部での膨張比が 30 で、出口では 100 とした。計算を行った領域は、ノズルスロート部から下流部分のみである。比熱比は 1.25 とし、酸素と水素の混合比を 1:6 とした。スロート部での条件は、圧力を 50 atm、温度を 3000 K、マッハ数を 1 とした。これは、燃焼室条件で、圧力が 90 atm、温度は 3375 K に相当する。壁面では、断熱壁条件を用いた。外気圧は、0.1 atm から 1.5 atm まで変化させて、外気温度は 300 K で一定とした。

4. 結果

流れの様子

Fig. 3 は、大気圧が 1.0 atm 及び 0.5 atm のときのノズル内部のマッハ数分布を示している。この図から、大気圧が 1.0 atm のとき、変曲部から衝撃波が形成され、そこで流れが安定して剥離している様子がわかる。即ち、大気圧が高いとき、変曲部での小さいノズル膨張比でこのノズルが運用可能であることがわかる。このとき、変曲部より下流側では、剪断層が形成され、そこを境にしてノズル壁面近傍で循環領域が形成されている。

一方、大気圧が 0.5 atm のとき、剥離位置は変曲部からノズル出口付近へと遷移している。即ち、大気圧が低くなると、ノズル出口での大きなノズル膨張比でこのノズルが

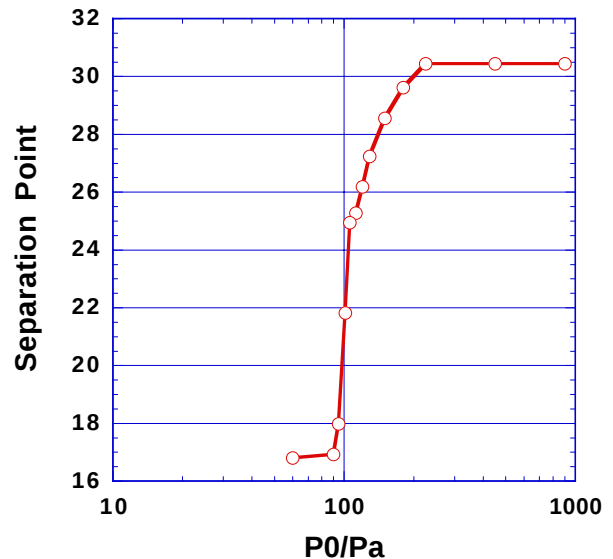


Fig. 5 Effect of ambient pressure on a separation point

運用可能であることがわかる。

Fig. 4 は、大気圧が 1.0 atm 及び 0.5 atm のときのノズル内部の圧力分布を示している。この図では、圧力分布をわかりやすくするために、上限を 1.0 atm に制限している。この図からも、大気圧が 1.0 atm のとき、変曲部で流れが安定して剥離している様子がわかる。また、大気圧が 0.5 atm のとき、変曲部から下流側では、ノズル内部の流れが急激に膨張し、圧力が非常に低い値となる領域が形成され、その結果、剥離位置はノズル出口付近へと遷移している。

剥離位置の変化

次に、流れ構造が変化する大気圧を調べるために、大気圧をいろいろ変化させて計算を行った。Fig. 5 は、横軸に燃焼室圧力と大気圧の比、縦軸にスロート半径で無次元化された剥離位置を示している。この図から、剥離位置が遷移する圧力比は、概ね 100 程度となることがわかる。また、この圧力比で急激に剥離位置が変化することから、ロケットに使用した場合、ある小さい大気圧の変化、即ち上昇飛行中の短い時間で流れ構造の遷移が起きることを示しており、これは Dual-Bell ノズルの特性の一つである流れ構造の遷移が瞬間的に起きることを裏付けている。

5. まとめ

本研究では、Dual-Bell ノズル内の流れ構造を把握するために数値解析を行った。その結果、Dual-Bell ノズルは、低高度、即ち大気圧が高いところでは、変曲部で強制的に剥離を引き起こし、小さいノズル膨張比として運用し、そして、高々度では大きい膨張比での運用が可能であることが確認できた。また、変曲部での剥離状態からノズル出口での剥離状態への流れ構造の遷移は、燃焼室圧力と大気圧との比で 100 付近で急激に起こることが分かった。これは、Dual-Bell ノズルの特徴である、ノズル内流れ構造の遷移が短い時間で起きることを裏付けている。

参考文献

1. Hagemann, G., Frey, M., and Manski, D., "A Critical Assessment of Dual-Bell Nozzles," AIAA Paper, AIAA 97-3299, June, (1997)
2. Wada, Y. and Liou, M.-S., "A Flux Splitting Scheme with High-Resolution and Robustness for Discontinuities," AIAA Paper, AIAA 94-0083, January, (1994)